

## Présentation

Cet article présente un travail pratique permettant une introduction progressive et pragmatique aux systèmes asservis. Les activités sont menées autour d'un axe linéaire (Control'X de DMS).

Le TP s'adresse à des élèves de 1<sup>o</sup> année de CPGE. Compte tenu de son caractère "découverte", on peut facilement envisager d'élargir ce public aux BUT ou BTS mais aussi en prébac, à la spécialité sciences de l'ingénieur.

L'expérience montre que l'étude des asservissements finit bien souvent par être vue uniquement sous le prisme mathématique, l'aspect technologique passant au second plan.

Si la mise en place d'une rétroaction associée à une structure de pilotage basée sur un couple {soustracteur + correcteur} est naturelle pour nous, professeurs, l'expérience montre que ce n'est pas forcément le cas pour nos étudiants.

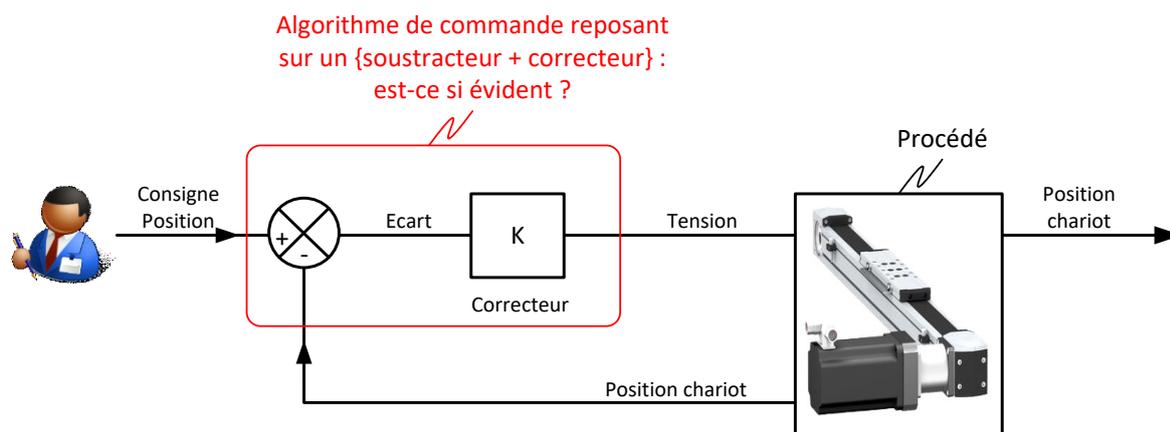


Figure 1 : ce que l'on vise : un feedback : "nourri depuis l'arrière"

D'un point de vue historique, un asservissement (ou une régulation) n'est qu'une invention très récente. On connaît tous le régulateur à boules (Huygens sur des moulins puis Watt sur des machines à vapeur) qui date d'à peine plus de 200 ans. Si ces inventions sont récentes, leur formalisation mathématique l'est encore plus : Maxwell et Routh (fin du XIX<sup>e</sup> siècle), Black, Nyquist, Bode, Nichols (milieu du XX<sup>e</sup> siècle).

Ce qui est certain, c'est que les réalisations technologiques ont bien souvent précédé leur étude théorique. Les activités proposées dans ce TP permettent d'aborder les solutions technologiques avant leur modélisation.

Pour argumenter un peu plus dans ce sens on peut penser à des solutions alternatives à la classique boucle de rétroaction :

- La commande par retour d'état ;
- La correction floue ;
- L'ajout d'une boucle d'anticipation (feedforward) ;
- L'ajout d'une boucle interne (correction tachymétrique par exemple);
- La commande dont l'élaboration est entièrement confiée à une intelligence artificielle.

Toutes ces solutions permettent aussi d'asservir une grandeur physique. Encore une fois, la structure reposant uniquement sur un couple {soustracteur + correcteur} n'est ni naturelle ni évidente !

### Résumé des activités clés du TP

---

La finalité des activités consiste à réussir à positionner le chariot de l'axe linéaire à 300 mm et ce, le plus rapidement et le plus précisément possible. Ces derniers critères de performance restent encore intuitifs à ce stade.

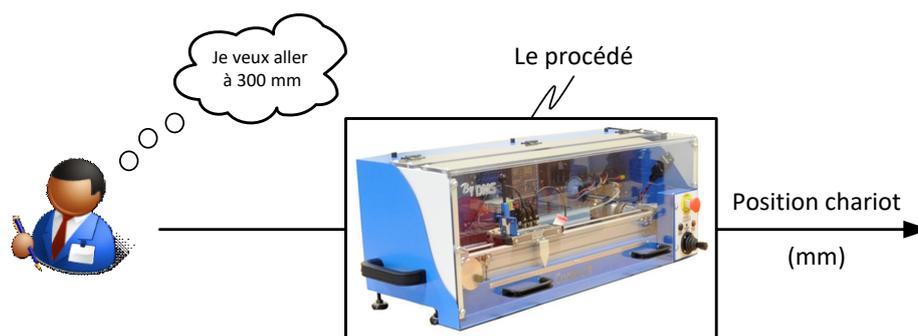


Figure 2 : comment positionner le chariot ?

## 1° Etape : pilotage en boucle ouverte au joystick

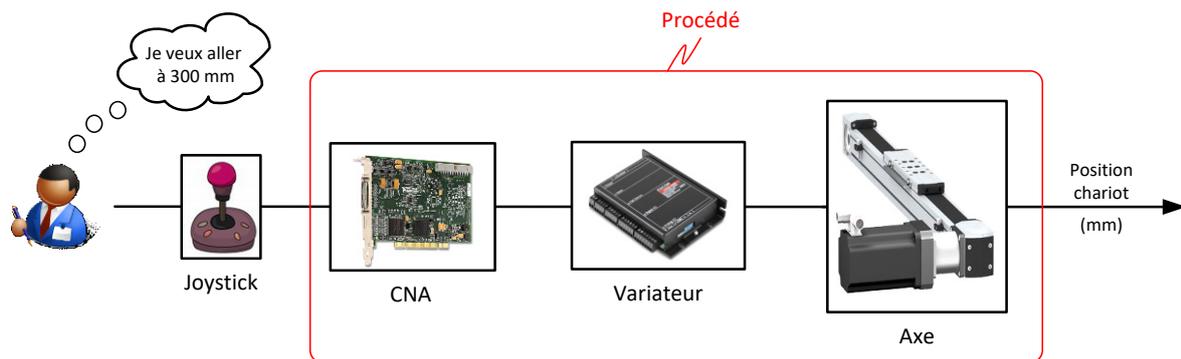


Figure 3 : détail des éléments clés de la chaîne directe

En manipulant le joystick, les élèves pilotent le système en boucle ouverte, la tension moteur est alors proportionnelle à la position angulaire du joystick :

- Ils tentent un positionnement à 300 mm avec le plus d'efficacité possible ;
- Ils peuvent commencer à prendre conscience de la relation qui lie la position du joystick, la tension moteur et la position ou la vitesse du chariot ;
- Ils observent qu'il peut y avoir dépassement et qu'il faudra sans doute plusieurs itérations du type : "observation du chariot – réflexion - manipulation du joystick" pour réussir à se rapprocher du but.

Les élèves réalisent que le positionnement est long et imprécis. Comme élément de comparaison, on leur indique qu'en mode asservi, avec un algorithme de pilotage performant, le positionnement à 300 mm peut se faire en 250 ms avec une précision de 15 microns.

Le défi est lancé, peuvent-ils faire mieux en pilotant le système en boucle ouverte au joystick ? Quel est cet algorithme de pilotage automatique dont on vient de parler ?

## 2° étape : pilotage en boucle ouverte avec tension pré-calculée

On continue à viser un positionnement de chariot à 300 mm. Le pilotage s'effectue toujours en boucle ouverte mais la tension n'est plus issue du joystick. Elle provient d'un calcul effectué par un ordinateur sur la base d'un modèle.

Les élèves exploitent deux modèles très simples de boucle ouverte pour prévoir la tension moteur nécessaire :

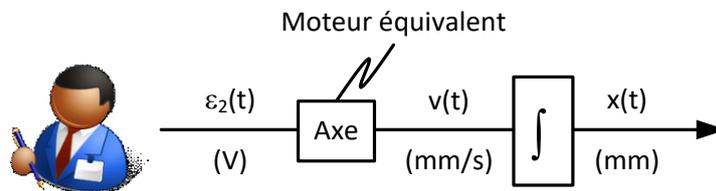


Figure 4 : structure du modèle

**Modèle 1 :** moteur sans dynamique : pour une tension d'alimentation constante donnée  $\varepsilon_2(t)$ , la vitesse  $V_\infty(t)$  est atteinte immédiatement. Tension de seuil  $u_{\text{seuil}}$  négligée. Tension de saturation  $V_{\text{sat}}$  prise en compte.

**Modèle 2 :** moteur sans dynamique. Tension de seuil  $u_{\text{seuil}}$  et tension de saturation  $V_{\text{sat}}$  prises en compte.

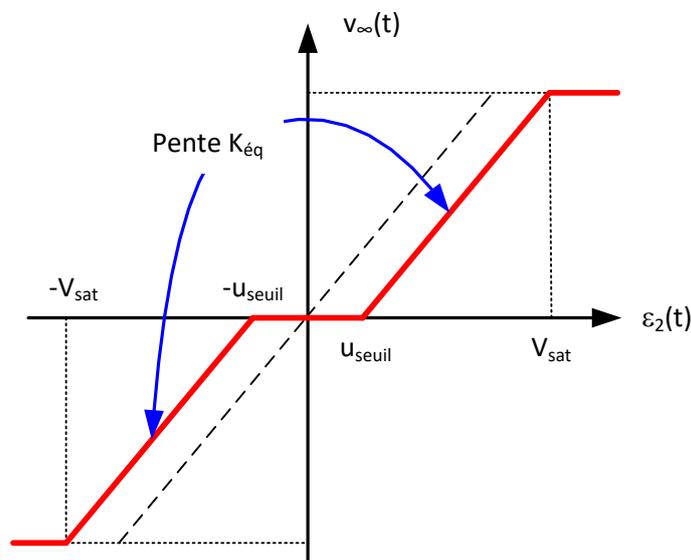


Figure 5 : détail des modèles proposés

Avec des modèles pas forcément très évolués, cela fonctionne déjà assez bien, tant en termes de précision que de rapidité (300 ms pour se stabiliser à 299 mm)

... sauf qu'il faut un modèle ! Et qu'un modèle, aussi fin soit-il, n'est que le reflet plus ou moins fidèle du système réel ! On insiste sur le fait que la précision de positionnement peut être très fortement impactée par la présence de perturbations.

### 3° étape : pilotage en boucle fermée

Le pilotage en boucle ouverte ayant montré ses limites, on imagine alors un mode de commande de type automatique. Un mode de commande dans lequel le pilotage se ferait non plus en imposant une entrée en tension (la commande) mais directement la position souhaitée (la consigne). C'est à cet algorithme de commande de calculer lui-même, en temps réel, la tension à appliquer au moteur pour aller au but dans les meilleures conditions.

On vise toujours un positionnement de chariot à 300 mm le plus rapidement et le plus précisément possible. La cerise sur le gâteau serait que les performances de positionnement n'aient pas (ou peu) à dépendre de :

- La finesse d'un quelconque modèle mis en place. Ce n'était pas le cas jusqu'à présent ;
- La variation éventuelle au cours du temps de certains paramètres caractéristiques du système (vieillissements, variations des frottements par exemple) ;
- La présence de perturbations.

On revient alors sur le pilotage au joystick, en boucle ouverte, effectué en début de TP mais cette fois-ci pour imaginer ce qu'il s'est passé dans le cerveau de l'opérateur pendant cette manipulation. On cherche à analyser finement la façon dont le joystick a pu être déplacé : quels sont les paramètres dont l'opérateur a tenu compte, comment modéliser son comportement, quelle équation mathématique faire coller sur son mode d'action ?

Les élèves découvrent que les yeux de l'opérateur peuvent à priori être remplacés par un capteur de position et son mode d'action par un calculateur !

On ne parle pas tout de suite du couple {soustracteur + correcteur}, on tâche d'y arriver progressivement en utilisant plusieurs stratégies de commande.

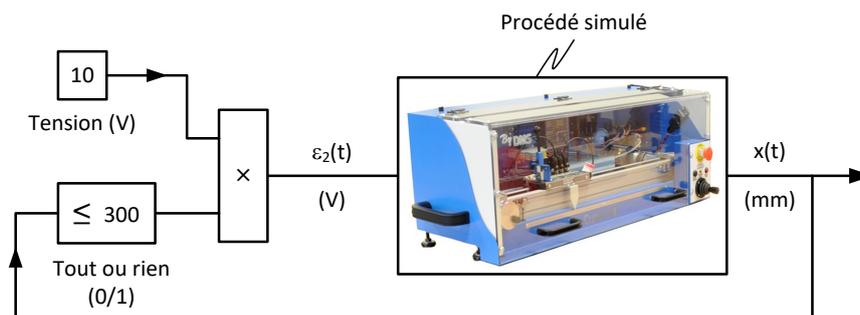


Figure 6 : stratégie "tension maxi jusqu'à ce que le but soit atteint"

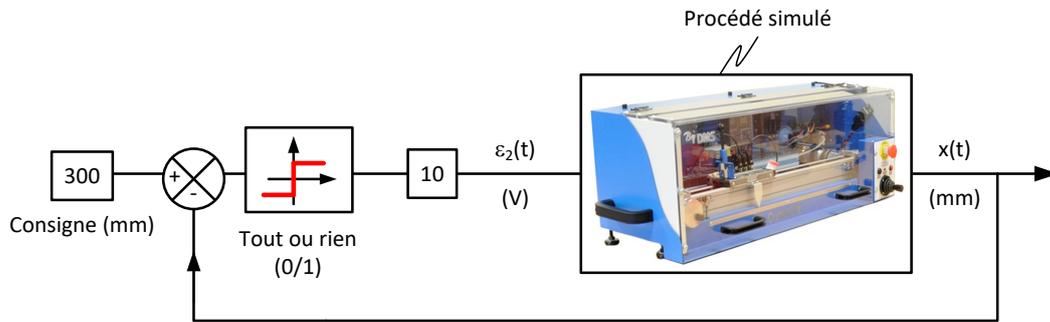


Figure 7 : stratégie "tension maxi (algébrique) tant que le but n'est pas atteint"

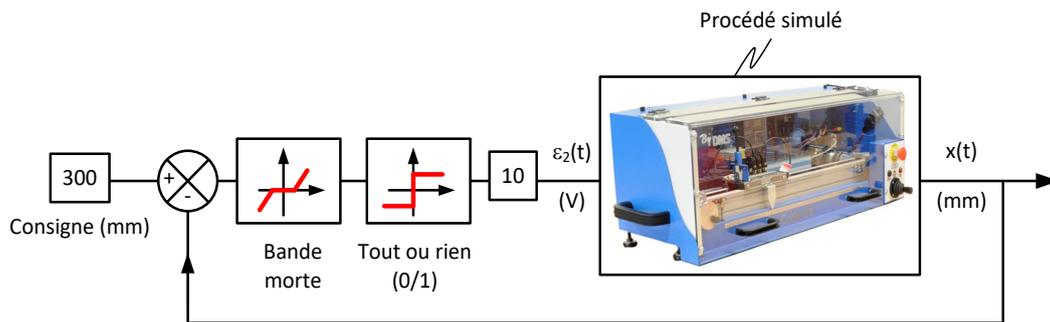


Figure 8 : stratégie "tension maxi (algébrique) tant que le but n'est pas atteint avec une petite marge de précision donnée par la bande morte"

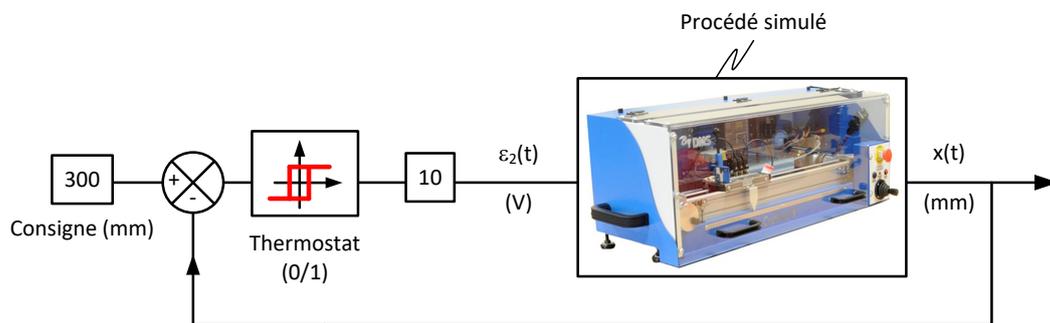


Figure 9 : stratégie du type thermostatique (avec hystérésis)

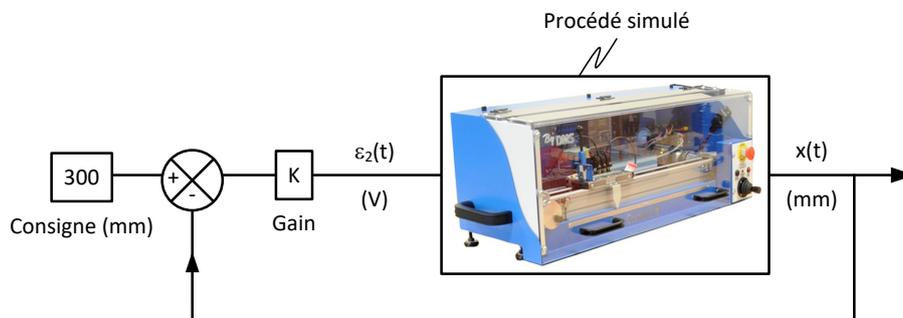


Figure 10 : la boucle de rétroaction classique, enfin !

Tous ces modes de pilotage en boucle fermée conduisent progressivement et naturellement vers le classique algorithme de commande basé sur le couple {soustracteur + correcteur}.

On peut revenir encore une fois sur le pilotage au joystick, en boucle ouverte, du début du TP. A priori, de façon inconsciente, l'opérateur met en place un algorithme de correction type stratégie n°1 ou 2 lorsqu'il est peu expérimenté et progressivement avec un tout petit peu d'expérience se dirige vers la stratégie n°5. Avec encore plus d'expérience, il mettra certainement en place une stratégie qui tient compte de la somme des écarts passés (action intégrale) et qui essaye d'anticiper le comportement futur (action dérivée).

Dans le TP, les résultats de la mise en œuvre de ces différentes stratégies sont observés en simulation mais pourraient très bien l'être en pilotant directement le système réel :

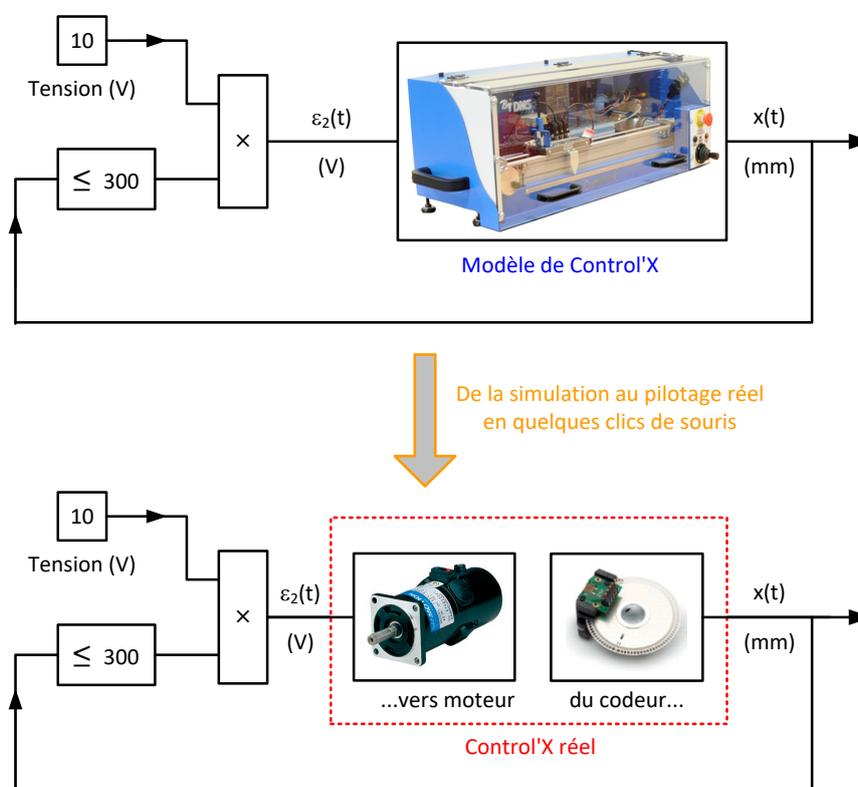


Figure 11 : substitution du pilotage à la simulation pour l'une des stratégies de pilotage

#### 4° étape : conclusion

Ca y est, une boucle de rétroaction basée sur un couple {soustracteur + correcteur} semble combiner tous les avantages. Les élèves ont découvert que le choix du gain de correcteur peut conduire à des performances très différentes depuis un comportement lent et très amorti jusqu'à un comportement rapide et peu amorti voire instable.

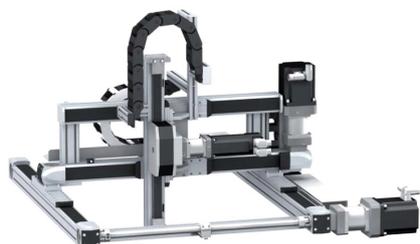
Les élèves ont trouvé un correcteur proportionnel de gain adapté par une méthode du type essai-erreur. Ils ont maintenant à leur disposition un système asservi qui semble présenter des performances intéressantes.

... et pourtant, ils n'ont rien eu à modéliser, ils n'ont fait aucun calcul ! Comment est-ce possible ? Quel est alors le rôle joué par le modèle dans le processus de conception d'un système asservi ? Est-il toujours nécessaire ? Est-ce un moyen, est-ce un but ?

Les réponses seront apportées dans un prochain article. On présentera une démarche de synthèse de correcteur du type "Model-Based Design", reposant entièrement et le plus longtemps possible sur l'exploitation d'un modèle.

## Quelques mots sur l'axe linéaire utilisé

L'axe linéaire Control'X commercialisé par la société DMS est une version didactique d'un robot multiaxes commercialisé par Schneider. Il est en tout point identique à celui utilisé dans l'industrie en ce qui concerne sa partie mécanique : réducteur, poulies-courroie, chariot, guidages.



Robot multiaxe industriel



Control'X



Figure 12 : du système industriel au système pédagogique

Control'X est un axe linéaire asservi en position. Il repose principalement sur les éléments matériels suivants :

- Un PC qui fait tourner un logiciel de contrôle-commande
- Une carte de commande
- Une carte de puissance (variateur de vitesse)
- L'axe proprement dit : moteur, réducteur, poulies-courroie, chariot et codeur incrémental

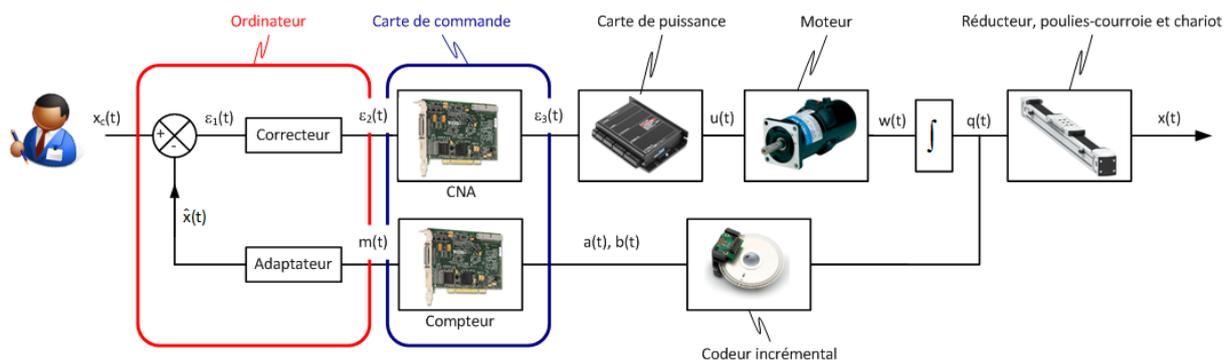


Figure 13 : structure de l'asservissement

Control'X est équipé de très nombreux capteurs, le seul indispensable à l'asservissement de l'axe dans son contexte d'origine est le codeur incrémental monté en bout d'arbre moteur.

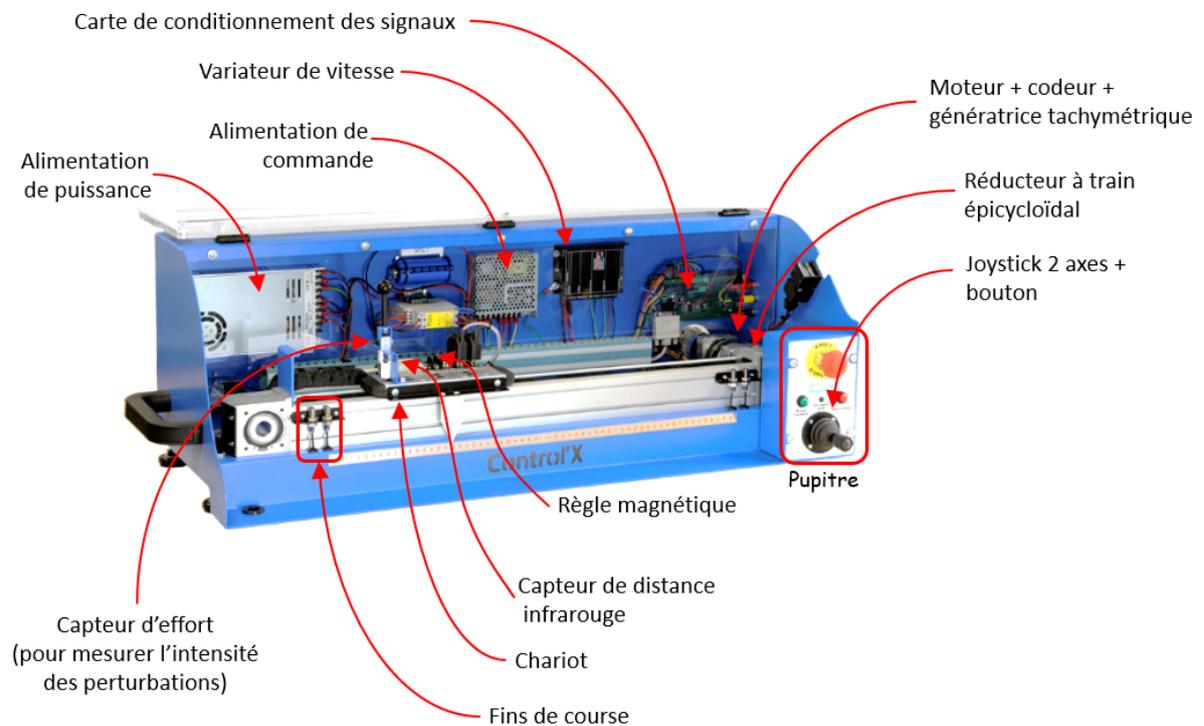


Figure 14 : instrumentation

Parmi les capteurs " pédagogiques", on trouve :

- Capteur de tension en sortie de carte de commande (entrée de variateur)
- Capteur de tension moteur
- Capteur d'intensité moteur
- Génératrice tachymétrique montée en bout d'arbre moteur
- Capteur d'efforts exercés sur le chariot
- Règle magnétique montée sur le chariot
- Capteur de tension pour signaux optionnels (codeur supplémentaire, accéléromètre, capteur de distance infrarouge)

Les schémas ci-après présentent plus finement l'architecture de Control'X :

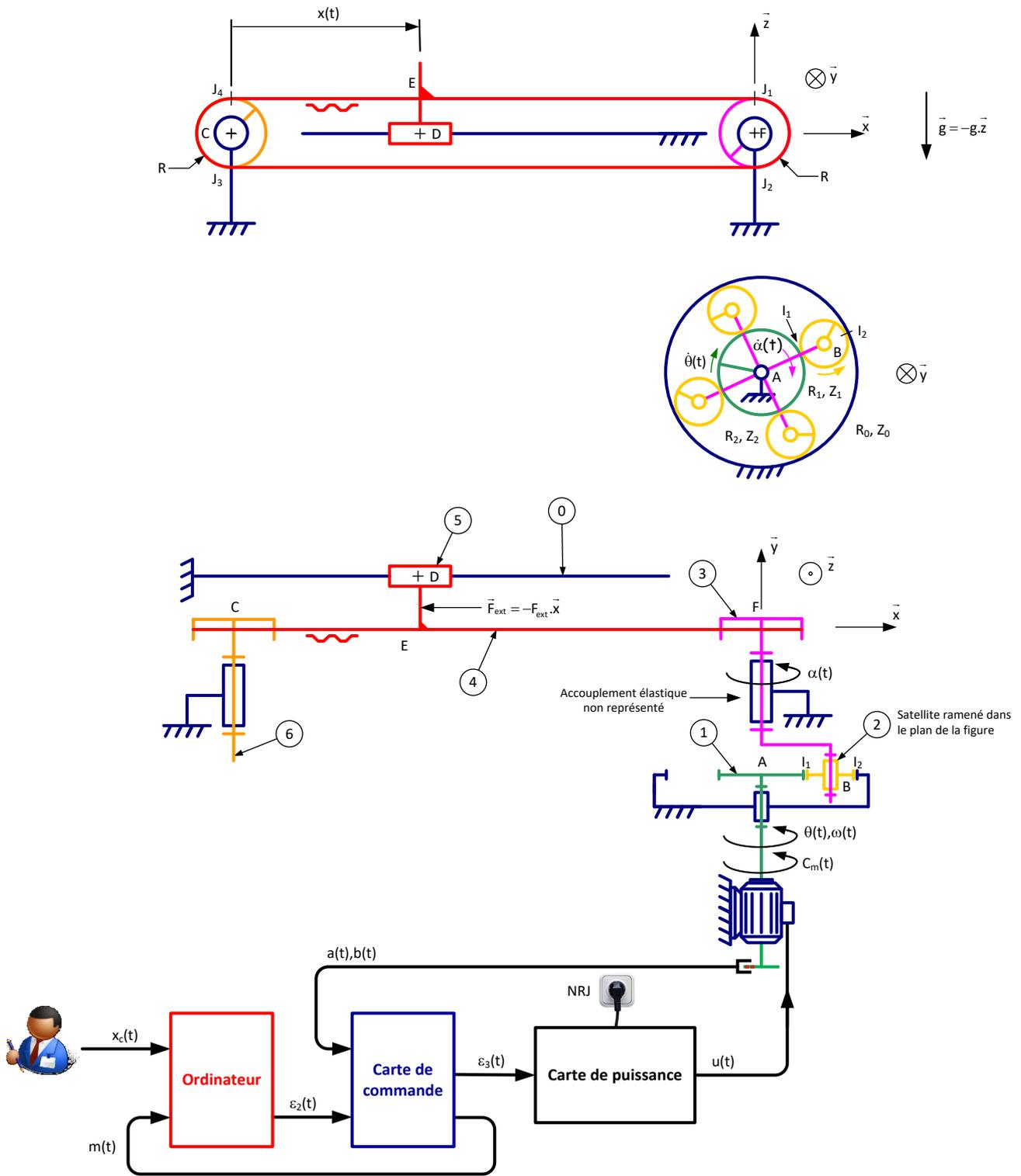


Figure 15 : structure générale

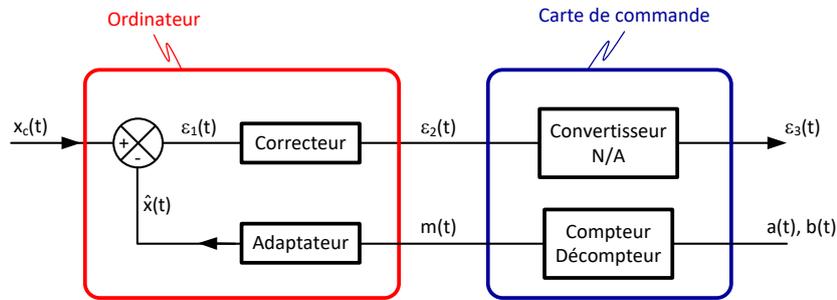


Figure 16 : détail des fonctions remplies par l'ordinateur et la carte de commande

Le schéma ci-dessous met en évidence l'organisation structurelle et fonctionnelle des composants nécessaires à la mise en œuvre de l'asservissement de position.

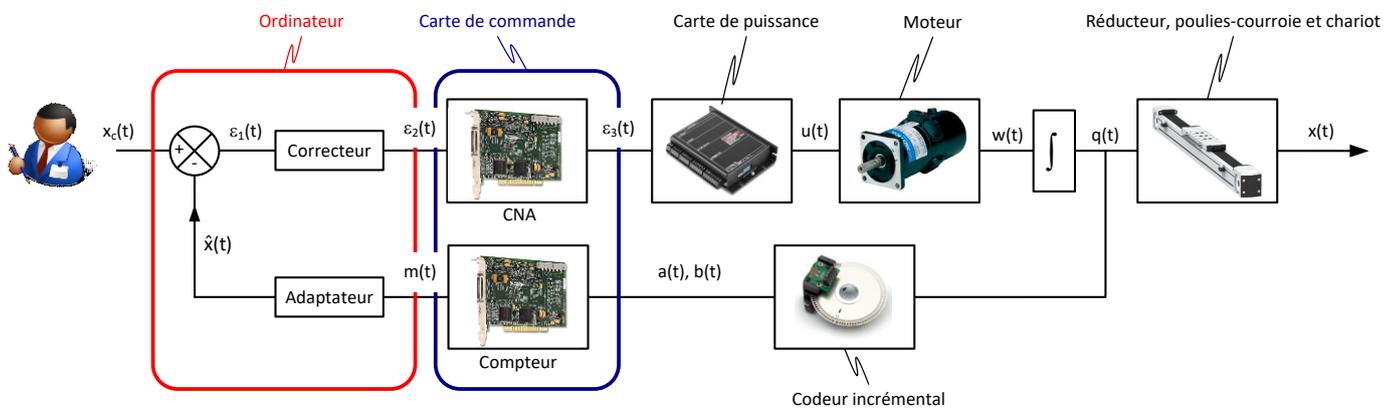


Figure 17 : schéma bloc de l'asservissement

### Fonction de la carte de commande :

#### Coté acquisition :

- Acquérir les deux signaux  $a(t)$  et  $b(t)$  en quadrature de phase venant du codeur incrémental ;
- Compter ou décompter les impulsions  $a(t)$  et  $b(t)$  issues du codeur pour élaborer un signal numérique  $m(t)$  en incréments image de la position linéaire  $x(t)$  du chariot ;
- Transmettre le résultat de ce comptage  $m(t)$  à l'ordinateur.

#### Coté génération

- Recevoir le signal "écart corrigé"  $\varepsilon_2(t)$  provenant de l'ordinateur ;
- Elaborer la tension analogique  $\varepsilon_3(t)$  par conversion numérique analogique de  $\varepsilon_2(t)$ .

Nota : la carte de commande ne constitue qu'une interface entre le PC et le procédé : ce n'est pas elle qui effectue les calculs de commande d'axe (adaptation, soustraction, correction).

### Fonction de l'ordinateur :

- Acquérir la consigne  $x_c(t)$  de l'utilisateur (entrée directement en mm par l'utilisateur).
- Adapter le signal de mesure  $m(t)$  en incréments en signal  $\hat{x}(t)$  en mm ;
- Soustraire le signal  $\hat{x}(t)$  au signal de consigne  $x_c(t)$  pour obtenir l'écart  $\varepsilon_1(t)$  ;
- Appliquer un algorithme de correction pour transformer l'écart  $\varepsilon_1(t)$  en écart corrigé  $\varepsilon_2(t)$ .

### Fonction de la carte de puissance :

Ici cette carte n'est utilisée qu'en mode "variateur de vitesse" : les boucles internes de courant et de vitesse sont désactivées.

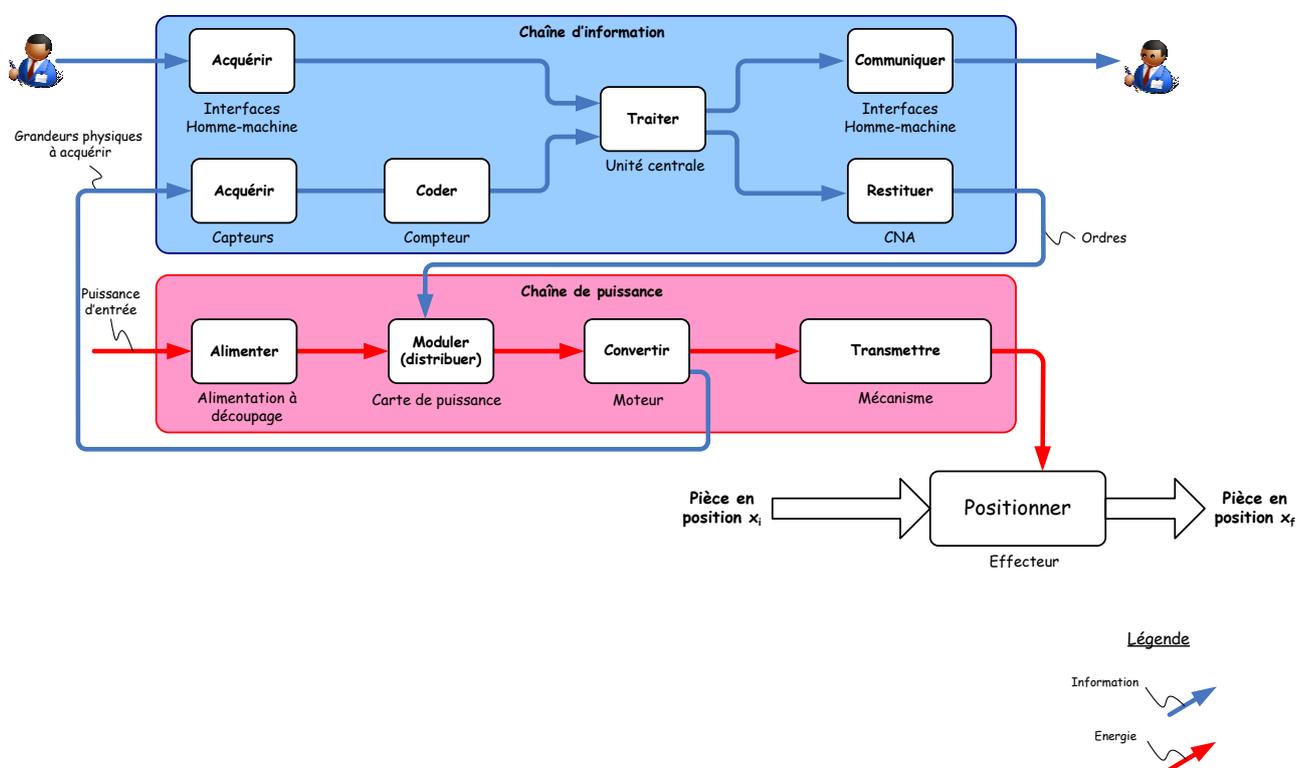


Figure 18 : chaîne fonctionnelle

Le système Control'X se pilote depuis un logiciel dédié mais aussi de façon 100 % ouverte sous matlab-Simulink à une fréquence d'échantillonnage pouvant atteindre 20 kHz.

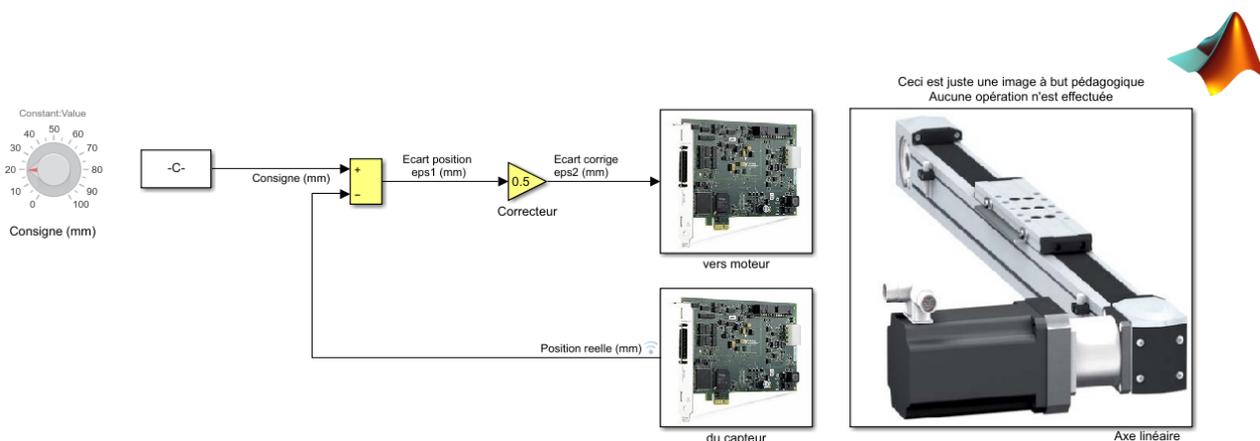


Figure 19 : pilotage sous Matlab-Simulink (fréquence d'échantillonnage jusqu'à 20 kHz)

Une bibliothèque contenant tous les blocs d'entrée-sortie ainsi que des modèles usuels de Control'X sont fournis :

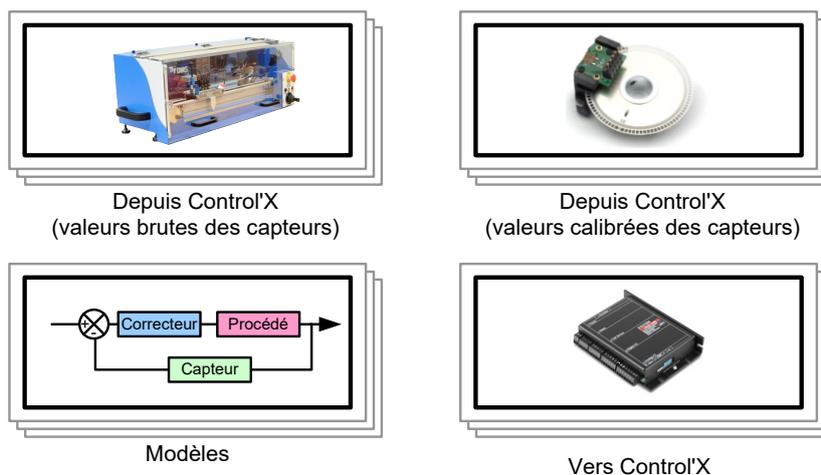


Figure 20 : bibliothèque de composants

La très riche instrumentation associée à une architecture de commande sous Matlab-Simulink 100 % ouverte autorise de très nombreux projets. Parmi eux, on peut citer :

- Grue anti-ballant
- Pendule inversé
- Absorbeur dynamique de vibrations
- Contrôleur haptique
- Robot collaboratif
- Machine de traction
- Régulation de distance auto adaptative...